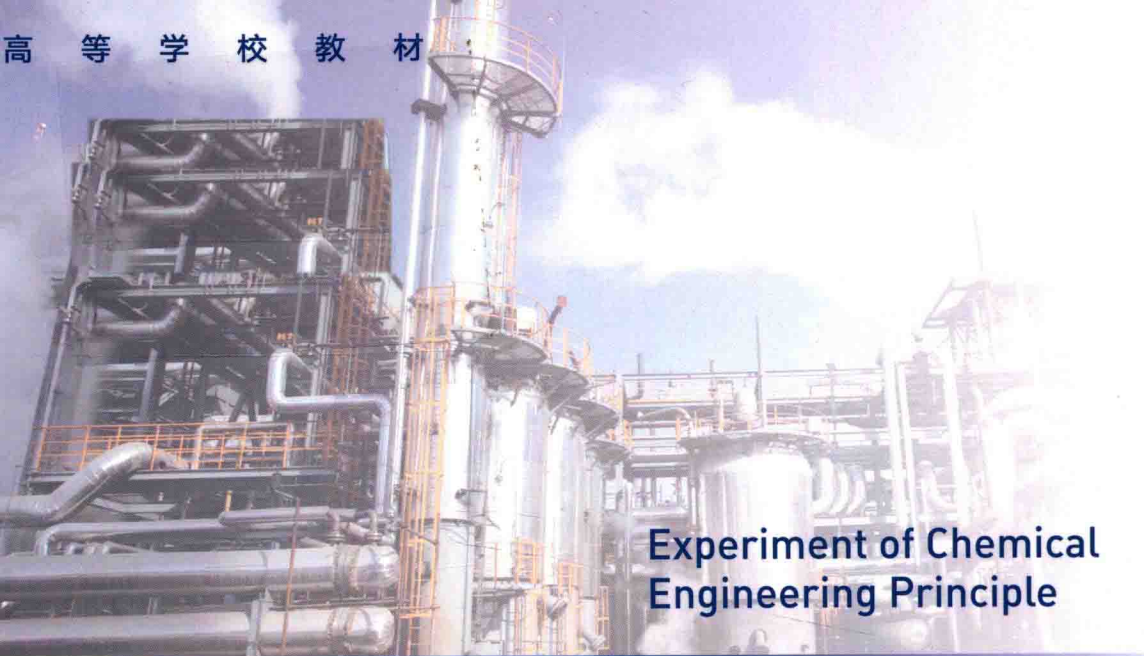


高 等 学 校 教 材



Experiment of Chemical
Engineering Principle

化工原理实验

赫文秀
兰大为 编
王亚雄

高等教育出版社

高 等 学 校 教 材

Experiment of Chemical
Engineering Principle

化工原理实验



赫文秀
兰大为
王亚雄

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是化工原理、食品工程原理、环境工程原理、制药工程原理等相关课程的配套实验教材。本书从化学工程学科发展对相关实验提出的要求出发,重新构造教学内容框架,突出现代化学工程从单元技术研究向以化学产品为对象的综合技术研究转变的特点,重点培养学生综合素质,通过实验使学生掌握化工生产的单元操作技能、实验研究方法,以及提高分析问题和解决问题的能力。

全书共五章,分别为绪论、实验研究方法、实验数据误差分析及处理、化工常用仪表及测量技术、化工原理实验内容。本书可作为高等学校化工、轻化工程、化学、制药、食品、机械、环境、生物等相关专业的实验教材,也可供化学工程等领域相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理实验 / 赫文秀, 兰大为, 王亚雄编. -- 北京: 高等教育出版社, 2017.10

ISBN 978-7-04-048549-3

I. ①化… II. ①赫… ②兰… ③王… III. ①化工原理-实验-高等学校-教材 IV. ①TQ02-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 226691 号

Huagong Yuanli Shiyān

策划编辑 翟 怡
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 翟 怡
责任校对 吕红颖

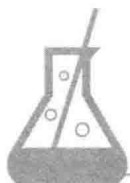
封面设计 赵 阳
责任印制 耿 轩

版式设计 马 云

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京市密东印刷有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 9.25
字 数 130 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2017 年 10 月第 1 版
印 次 2017 年 10 月第 1 次印刷
定 价 18.50 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 48549-00



前言

化工原理实验属于工程类实验范畴,不同于物理、化学等基础理论课程的实验。化工原理实验作为化工类创新人才培养过程中重要的实践环节,在化工教育中起着至关重要的作用,其所研究的对象均涉及复杂的化工过程中的实际问题,因此它具有直观性、实践性、创新性和综合性。本书针对化工原理实验的工程实践性,以培养实验研究过程中所需的能力和素质为目的,以具体的单元操作实验为研究对象,以处理工程实践问题的方法为主线,对化工原理实验进行了相应的改革,更新了实验内容。着重培养学生理论联系实际的能力和工程思维,力求加强实验者科学的工程实验方法论思维能力和科学的实验组织规划及实验设计能力。

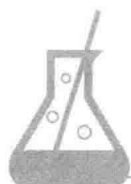
本书是在内蒙古科技大学化工原理课程教学团队多年来的教学实践与先前编写《化工原理实验》教材的基础上,参考国内外相关书籍,结合当前化工原理课程的发展趋势、化工原理实验特点及学生自身发展情况,对原教材中部分内容和实验进行了修改。本书从工程实验的角度出发,以化工流动过程综合实验(流动阻力测定、离心泵性能测定)、板框过滤常数测定实验、气-汽对流传热综合实验、板式精馏塔实验、填料吸收塔性能及吸收实验、液-液萃取塔实验、干燥速率曲线测定实验七个单元操作实验为具体研究对象,较全面地阐明了化工原理实验的研究方法、实验数据处理、化工常用仪表及测量技术等内容。

本书由赫文秀、兰大为、王亚雄编写,参与编写工作的还有郎中敏、李玉生。在此,编者对在本书编写过程中给予热心帮助和支持的老师表示衷心的感谢。

本书在编写过程中,参阅了有关书籍、期刊及优秀高校的讲义等大量资料,由于篇幅有限,未能一一列举,谨此说明并致感谢。由于编者水平所限,书中难免存在不妥之处,衷心希望读者以科学严谨态度给予指教,使本书日臻完善。

编 者

2016年10月



目录

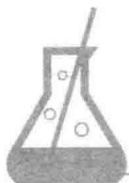
第一章 绪论	1
1.1 化工原理实验特点	1
1.2 化工原理实验教学目的	2
1.3 化工原理实验教学内容与方法	3
1.4 化工原理实验教学要求	4
1.5 学生实验守则	13
第二章 实验研究方法	14
2.1 直接实验法	14
2.2 量纲分析法	15
2.2.1 基本概念	15
2.2.2 量纲分析法的基础	16
2.2.3 量纲分析法规划实验的步骤	18
2.3 数学模型法	22
2.3.1 数学模型法主要步骤	22

2.3.2 数学模型法举例说明	22
第三章 实验数据误差分析及处理	25
3.1 实验数据的测量值及其误差	25
3.1.1 真值与平均值	25
3.1.2 误差的相关概念与分类	27
3.1.3 误差的表示方法	29
3.1.4 测量仪表的精度	31
3.1.5 准确度(精确度)、精密度和正确度	32
3.1.6 有限测量次数标准误差的计算	33
3.1.7 可疑测量值的舍弃	33
3.1.8 间接测量中的误差传递	34
3.2 有效数字及其运算规则	37
3.2.1 有效数字	37
3.2.2 有效数字的运算规则	38
3.3 实验数据处理	39
3.3.1 列表法	39
3.3.2 图示法	41
3.3.3 方程表示法	42
第四章 化工常用仪表及测量技术	44
4.1 温度的测量	44
4.1.1 玻璃管温度计	46
4.1.2 热电偶温度计	47
4.1.3 热电阻温度计	48
4.2 压力的测量	50
4.2.1 液柱测压方法	50
4.2.2 弹性元件测压方法	53
4.2.3 电信号测压方法	54

4.3 流量的测量	54
4.3.1 测速管	55
4.3.2 变压头流量计	56
4.3.3 变截面流量计(转子流量计)	58
4.3.4 涡轮流量计	61
 第五章 化工原理实验内容	 63
5.1 化工流动过程综合实验	63
5.1.1 实验目的	63
5.1.2 实验内容	64
5.1.3 实验原理	64
5.1.4 实验装置的基本情况	68
5.1.5 实验方法及步骤	70
5.1.6 实验注意事项	72
5.1.7 实验数据表及计算结果	73
5.1.8 实验报告要求	77
5.1.9 思考题	77
5.2 板框过滤常数测定实验	77
5.2.1 实验目的	77
5.2.2 实验内容	78
5.2.3 实验原理	78
5.2.4 实验装置的基本情况	79
5.2.5 实验方法及步骤	80
5.2.6 实验注意事项	80
5.2.7 实验数据表及计算结果	81
5.2.8 实验报告要求	82
5.2.9 思考题	82
5.3 气-汽对流传热综合实验	82
5.3.1 实验目的	82
5.3.2 实验内容	82

5.3.3 实验原理	83
5.3.4 实验装置的基本情况	85
5.3.5 实验方法及步骤	88
5.3.6 实验注意事项	88
5.3.7 实验数据表及计算结果	89
5.3.8 实验报告要求	91
5.3.9 思考题	91
5.4 板式精馏塔实验	91
5.4.1 实验目的	91
5.4.2 实验内容	91
5.4.3 实验原理	92
5.4.4 实验装置的基本情况	93
5.4.5 实验方法及步骤	96
5.4.6 实验注意事项	97
5.4.7 实验数据表及计算结果	99
5.4.8 实验报告要求	99
5.4.9 思考题	99
5.5 填料吸收塔性能及吸收实验	100
5.5.1 实验目的	100
5.5.2 实验内容	100
5.5.3 实验原理	100
5.5.4 实验装置的基本情况	102
5.5.5 实验方法及步骤	103
5.5.6 实验注意事项	107
5.5.7 实验数据表及计算结果	107
5.5.8 实验报告要求	110
5.5.9 思考题	110
5.6 液-液萃取塔实验	110
5.6.1 实验目的	110
5.6.2 实验内容	110
5.6.3 实验原理	111

5.6.4	实验装置的基本情况	112
5.6.5	实验方法及步骤	113
5.6.6	实验注意事项	114
5.6.7	实验数据表及计算结果	115
5.6.8	实验报告要求	116
5.6.9	思考题	117
5.7	干燥速率曲线测定实验	117
5.7.1	实验目的	117
5.7.2	实验内容	117
5.7.3	实验原理	117
5.7.4	实验装置的基本情况	119
5.7.5	实验方法及步骤	121
5.7.6	实验注意事项	122
5.7.7	实验数据表及计算结果	122
5.7.8	实验报告要求	124
5.7.9	思考题	124
附录		125
附录一	一些气体溶于水的亨利系数	125
附录二	某些二元物系的气液平衡组成	127
附录三	乙醇溶液常见参数表	129
附录四	化工原理实验习题	130
参考文献		134



第一章 绪论

1.1 化工原理实验特点

化工原理实验是化学工程与工艺、制药工程、环境工程、食品工程、生物工程、过程装备与控制工程等专业教学计划中的一门必修课程。围绕化工原理课程中最基本的理论,开设有设计型、研究型和综合型实验,培养学生掌握实验研究方法,训练其独立思考、综合分析问题和解决问题的能力。化工原理实验属于工程实验范畴,与一般化学实验相比,具有很强的工程实践性,涉及物理学、物理化学、分析化学、仪器分析、化工仪表及自动化等很多学科领域知识,内容广泛。每个实验项目都相当于化工生产中的一个单元操作,通过实验能建立起一定的实际工程概念,因此,在实验课的全过程中,会遇到的大量工程实际问题,通过学习不仅可以更实际、更有效地了解工程实验方面的原理及测量手段,还能培养学生的思维方法和创新能力,为今后的学习和工作打下坚实的基础。化工原理实验的另一特点是理论联系实际。化工过程由很多单元操作和设备所组成,学生应学会运用理论去指导并独立进行化工过程的操作,应能在现有设备中完成指定的任务,并预测某些参数的变化对过程的影响。

1.2 化工原理实验教学目标

化工原理是一门技术基础课,除了系统地教授化工原理基础理论知识外,实验教学也是一个必不可少的实践性环节。因此,化工原理实验教学在化工原理课程教学中的作用、地位及其意义不容小觑。

在进行化工原理实验或进行任何其他科学实验时,实验人员首先要具有最基本实验态度——实事求是。“实事求是”就是要把实验所观察到的现象、数据、规律真实地记录下来,作为第一手的资料。科学推理要以实验观测为依据,科学理论要用实验观测来检验,因此记录下来的应该是实际观测的情况而不能在任何理由下加以编造、修改。只有具备了这种最基本的态度,实验工作才能为自己、为他人提供有意义的材料,实验人员才可能充分理解化工原理实验的根本意义,才能积极主动地根据实验要求来工作,并使自己受到良好正确的训练,不断提高自身的科学实验能力。

化工原理实验的教学目的主要有以下几方面:

1. 巩固和深化理论知识

在学习化工原理课程的基础上,按照化工原理实验教学目标的规定,分别从实验目的、实验原理、实验装置流程、数据处理分析等方面,组织各单元操作的实验内容,从而进一步理解一些比较典型的已被或将被广泛应用的化工过程与设备的原理和操作,巩固和深化化工原理的理论知识。

2. 提供一个理论联系实际的机会

运用所学的化工原理等化学化工的理论知识去解决实验中遇到的各种实际问题,同时学习在化工领域内如何通过实验获得新的知识和信息。例如:在化工、轻工等工业生产和实验研究中,经常测量的物理量有温度、压力、流量等,保证测量值达到所要求的精度,涉及测量技术的问题。通过在化工原理实验教学中增加常用测试仪器的基本原理和使用方法的介绍,可以丰富学生的实践知识。

3. 培养科学实验的能力

对于化学工程与工艺专业来说,化工原理实验之前有分析化学、物理化

学等基础实验,其后有专业实验和毕业设计(论文)环节,从教学角度来说,应按纵向来培养和逐步提高学生的实验和科研能力。

实验能力主要包括:① 具有设计实验方案的能力,并完成一定的研究课题;② 具有观察和分析实验现象和解决实验问题的能力;③ 正确选择和使用测量仪表的能力;④ 利用实验的原始数据进行数据处理以获得实验结果的能力;⑤ 运用文字、图表完成实验报告的能力等。

学生只有通过一定的实验训练,才能掌握各种实验技能,为将来从事科学研究和解决工程实际问题打好坚实的基础。

4. 培养科学的思维方法、严谨的科学态度和良好的科学作风通过化工原理实验课程的学习,培养学生严肃认真的学习态度和实事求是的科学态度,为将来从事科学研究和解决工程实践问题打好基础。

总之,化工原理实验的教学目的是着重实践能力和解决实际问题能力的培养,这些能力的培养是化工原理课程教学所无法取代的。

1.3 化工原理实验教学内容与方法

1. 化工原理实验教学内容

化工原理实验教学内容主要包括实验理论教学、计算机仿真实验和典型单元操作实验三大部分。

(1) 实验理论教学

实验理论教学主要讲述化工原理实验教学的目的、要求和方法,化工原理实验的特点,化工原理实验装置,化工原理实验的研究方法,实验数据的误差分析,实验数据的处理方法与化工原理实验有关的计算机数据采集与控制基本知识等。

(2) 计算机仿真实验

计算机仿真实验包括仿真运行、数据处理和实验测评三部分。

(3) 典型单元操作实验

典型单元操作实验的内容包括:化工流动过程综合实验、板框过滤常数测定实验、气-汽对流传热综合实验、板式精馏塔实验、填料吸收塔性能及吸收实验、液-液萃取塔实验和干燥速率曲线测定实验。

2. 化工原理实验教学方法

由于工程实验是一项技术工作,它本身就是一门重要的技术学科,有自己的特点和系统。为了切实加强实验教学环节,将实验课单独设立,每个实验均安排现场预习和实验操作两个单元时间。化工原理实验工程性较强,有许多问题需提前考虑、分析,并做好必要的准备,因此必须在实验操作前进行预习。化工原理实验室实行开放制度,学生实验前必须预约。

化工原理实验成绩实行结构成绩制,分为三部分:

(1) 预习报告书写内容是否全面,是否清楚实验目的、实验原理、实验内容及步骤,占 10%。

(2) 现场提问、实验操作情况占 40%。

(3) 实验总结报告占 50%。

1.4 化工原理实验教学要求

化工原理实验包括:实验前的预习;实验过程操作;测定、记录和数据处理;撰写实验报告四个主要环节。各个环节的具体要求如下。

1. 实验前的预习

要达到实验目的中所提出的要求,仅靠了解实验原理是不够的,必须做到以下几点:

(1) 认真阅读实验讲义,复习化工原理课程教材及参考书的有关内容,掌握操作规程和安全注意事项。为培养能力,应对每个实验提出问题,带着问题到实验室现场预习。

(2) 到实验室现场熟悉实验设备装置的结构和流程。

(3) 明确操作程序与所要测定参数的项目,了解相关仪表的类型和使用方法,确定操作程序、所测参数项目的调整,以及实验测试点的分配等。

(4) 进行仿真实验和仿真实验测评。

(5) 特别要注意设备的哪些部分及操作中哪些步骤会产生危险,若有危险该采用何种防护措施,来确保实验操作中人身和设备安全。

不预习者不得操作实验,预习报告经指导教师检查通过后方可进行实验。

2. 实验过程操作

一般以 2~3 人为一小组合作进行实验,实验前必须作好组织工作,做到分工明确,团结协作,每个组员要各负其责,并且要在适当的时候进行轮换工作,这样既能保证质量,又能获得全面的训练。实验操作注意事项如下:

(1) 实验设备在启动操作前必须检查,应按教材说明的程序逐项进行,调整设备进入启动状态后再进行送电、通水或气等操作。

① 对泵、风机、压缩机、真空泵等设备,启动前先用手扳动联轴节,看能否正常转动。

② 检查设备、管道上各个阀门的开、闭状态是否合乎流程要求。

上述两点皆为正常时,才能合上电闸,使设备运转。

(2) 操作过程中设备及仪表有异常情况时,应立即按照停车步骤停车并报告指导教师,对问题的处理应了解其全过程,这是分析问题和处理问题的极好机会。

(3) 操作过程中要认真、耐心,应随时观察仪表指示值的变动及所发生的各种现象,确保操作过程在稳定条件下进行。实验数据要记录在备好的表格内,对实验数据要判别其合理性,出现不符合规律的现象时应注意观察研究,分析其原因,不要轻易放过。

(4) 停车前应依次将有关气源、水源、电源关闭,然后切断电动机电源,并将各阀门恢复至实验前所处的位置(开或关)。

3. 测定、记录和数据处理

(1) 确定需要测定的数据

凡是与实验结果有关或是整理数据时必需的参数都应一一测定。原始数据记录表的设计应在实验前完成。原始数据应包括工作介质性质、操作条件、设备几何尺寸等。并不是所有数据都要直接测定,凡是可以根据某一参数推导出或根据某一参数由手册查出的数据,就不必直接测定。例如,水的黏度、密度等物理性质,一般只要测出水温后即可查出,因此不必直接测定水的黏度、密度,而应该改测水的温度。

(2) 实验数据的分割

一般来说,实验时要测的数据尽管有许多个,但常常选择其中一个数据作为自变量来控制,而把其他受其影响或控制的、随之而变的数据作为因变量,如离心泵特性曲线就把流量选定为自变量,而把其他同流量有关的扬程、轴功率、效率等参数作为因变量。实验结果又往往要把这些所测的数据

标绘在各种坐标系上,为了使实测数据能真实地反映客观规律,这里就涉及实验数据均匀分割的问题。化工原理实验最常用的有两种坐标系:直角坐标系和双对数坐标系,坐标不同所采用的分割方法也不同。其分割值与实验预定的测定次数及其最大、最小的控制量 $x_{\max}, x_{\min}$ 之间的关系如下。

① 对于直角坐标系:

$$x_i = x_{\min} \quad \Delta x = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{n-1} \quad \Delta x_{i+1} = x_i + \Delta x$$

② 对于双对数坐标系:

$$x_i = x_{\min} \quad \lg \Delta x = \frac{\lg x_{\max} - \lg x_{\min}}{n-1}$$

$$\Delta x = \left(\frac{x_{\max}}{x_{\min}} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad x_{i+1} = x_i \cdot \Delta x$$

(3) 读数与记录

实验数据的记录应仔细认真、清楚整齐。学生应注意养成良好的习惯,培养严谨的科学作风。

① 待设备各部分运转正常,或操作过程中改变操作条件,需待操作稳定乃至达到新的稳定状态后才能读取数据。判断已达稳定的方法一般是经两次测定其读数应基本相近。对于连续不稳定操作状态,要在实验前充分熟悉方法并计划好记录的位置或时刻等,否则易造成实验结果无规律甚至反常。

② 同一操作条件下,不同数据最好是数人同时读取,若操作者同时兼读几个数据时,应尽可能动作敏捷。

③ 每次读数都应与其他有关数据及前一组数据对照,看看是否相互关联并合理。如不合理应查找原因,是实验现象反常还是读数错误,并要在记录上注明。

④ 所记录的数据应是直接读取的原始数值,不要记录经过运算后的数据,例如,U形管压差计两端的液柱高度差,应分别读取记录,不要记录两者差值。

⑤ 根据仪表的精度,正确读取有效数字,读至仪表最小分度以下一位数为估计值,在测量时应进行估计,有利于对系统进行合理的误差分析。如水银温度计最小分度为 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,若水银柱恰好指示 $16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,应记为 $16.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。注意,过多取估计值的位数是毫无意义的。

若有些参数在读数过程中波动较大,首先要设法减小其波动。在波动不能完全消除的情况下,可取波动的最高点与最低点两个数据,然后取平均值,在波动不很大时可取一次波动的高低点之间的中间值作为估计值。

⑥ 对可疑数据,除有明显原因外(如读错、误记等),不要凭主观臆测修改记录数据,也不要随意舍弃数据,一般应在数据处理时检查处理。

⑦ 记录完毕要仔细检查一遍,有无漏记或错记之处,特别要注意仪表上的量程与计量单位。实验完毕将原始数据记录表格交给指导教师检查并签字,将一组实验数据记录到签到表上,确认准确无误后方可结束实验。

⑧ 实验结束后将实验设备和仪表恢复原始状态,切断电源,清扫卫生,经指导教师允许后方可离开实验室。

(4) 数据的整理及处理

① 原始记录只可进行整理,绝不可以随意修改。不正确的数据经判断确实为过失误差造成的,标明后可剔除,不计入结果。

② 采用列表法整理数据一目了然,便于比较,一张正式实验报告一般要有三种表格:原始数据记录表、中间运算表和综合结果表。中间运算表之后应附有计算示例,以说明各项之间的关系。若过程相似可以一组数据计算过程为例。

③ 运算中尽可能采用参数分解法和参数综合法,可避免重复及烦琐计算,减少计算错误,提高运算速度。

例如,流体阻力实验,计算 Re 和 λ ,可按以下方法进行。

Re 的计算:

$$Re = \frac{du\rho}{\mu}$$

其中 d, μ, ρ 在水温不变或变化甚小时可视为常数,合并为 $A = \frac{d\rho}{\mu}$, 故有

$$Re = Au$$

A 确定后,改变 u 可算出 Re 。

又如,管内摩擦系数 λ 的计算,由直管阻力计算公式:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho u^2}{2}$$

$$\lambda = \frac{d}{l} \cdot \frac{2}{\rho} \cdot \frac{\Delta p}{u^2} = B' \frac{\Delta p}{u^2} \quad (1-1)$$